

ANÁLISE PARAMÉTRICA DE UMA PLANTA CSP-ISCC DE TRIGERAÇÃO PARA UM HOSPITAL EM BOM JESUS DA LAPA

Diego Cunha Malagueta – diego.c.malagueta@macae.ufrj.br
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica
Alexandre Salem Szklo – szklo@ppe.ufrj.br
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Planejamento Energético
Ricardo Marques Dutra – rdutra.violino@gmail.com
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Planejamento Energético

Resumo. Este estudo apresenta uma análise paramétrica de uma planta CSP de concentrador cilindro-parabólico em arranjo em ciclo combinado (ISCC) para tri-geração (calor para refrigeração em ciclo de absorção, calor útil de baixa qualidade e eletricidade) em Bom Jesus da Lapa. A literatura científica internacional apresenta custos para geração elétrica centralizada a partir de CSP ainda incapazes de competir no mercado de energia no Brasil e no mundo sem auxílio de políticas de incentivo. Assim como indicam que o uso de CSP em cogeração encontra-se em fase de P&D. Por essas razões o estudo propõe uma planta de tri-geração como forma de investimento em pesquisa e desenvolvimento por parte do governo. O estudo propõe verificar a viabilidade técnica de implantação e operação da planta proposta. Para tal, a planta é dimensionada para atender a demanda térmica máxima de um hospital dimensionado para a região, e sua operação fora das condições de projeto é simulada para três dias com diferentes condições climáticas: os dias mais quente e mais frio do ano e um dia parcialmente nublado com oscilações horárias da radiação incidente. São comparadas também as performances de arranjo sem armazenamento térmico e outro com três horas de armazenamento. Os resultados apontam que o hospital seria energeticamente autossuficiente e geraria eletricidade no mínimo superior ao dobro da consumida, sendo assim um potencial vendedor de energia elétrica no mercado livre ou em contratos bi-laterais.

Palavras-chave: Energia Solar Térmica, Concentrador Solar, Cogeração, Simulação, Cilindro-parabólico

1. INTRODUÇÃO

A tecnologia CSP ainda não é economicamente competitiva sem a ajuda de políticas específicas de incentivo a plantas CSP, como se observa nos países onde há plantas CSP geradoras de eletricidade, principalmente EUA e Espanha (González, 2008; Taylor, 2008; Wiser *et al.*, 2011; IEA, 2010; Soria, 2011; Malagueta *et al.*, 2013; Malagueta, 2013).

Tsoutsos *et al.* (2010) simulam um sistema solar para calefação e refrigeração via ciclo de absorção para um hospital em Creta, Grécia. O sistema consiste em coletores solares planos instalados no terraço do edifício e sua operação foi simulada para um ano completo com dados gerados através de um histórico de trinta anos de dados meteorológicos.

Al-Sulaiman *et al.* (2012) analisam as performances e eficiências de diferentes arranjos de plantas CSP de cilindro-parabólico que produzam frio (em chiller de absorção), calor de processo e eletricidade em um ciclo rankine orgânico.

Este estudo objetiva avaliar a viabilidade técnica de operação de uma planta CSP em ciclo combinado (arranjo conhecido como ISCC, *Integrated Solar Combined Cycle*) que abasteça um hospital com eletricidade, refrigeração (através de um chiller de absorção) e calor de baixa qualidade (60 a 70°C). A cidade escolhida é Bom Jesus da Lapa, por ser a cidade brasileira com maior radiação direta normal (DNI), dentre as 24 cidades com os dados climatológicos hora a hora necessários disponíveis (SWERA, 2012). O hospital dimensionado é de médio porte e alto nível de conforto para atender a carência de leitos da região (Tolmasquim *et al.*, 2003; IBGE, 2009; KFF, 2012; OMS, 2012).

O estudo dimensiona a planta para a paridade térmica, de modo a atender a refrigeração do hospital durante a hora mais quente do ano. A operação da planta é simulada hora a hora para três dias: o dia mais quente do ano; o dia mais frio do ano; e o terceiro dia do ano, um dia parcialmente nublado com grande oscilação de DNI. O capítulo 2 apresenta a metodologia para a escolha da localidade, o dimensionamento do hospital e do projeto e arranjo da planta. No capítulo 3 são dimensionados o hospital, as condições de projeto da planta e os três dias de operação da planta. O capítulo 4 resume e discute os resultados das operações.

2. METODOLOGIA PARA SIMULAÇÃO DE PLANTA CSP DE TRI-GERAÇÃO QUE ATENDA ÀS DEMANDAS DE UM HOSPITAL

Este capítulo apresenta as metodologias utilizadas para: a escolha da localidade para a qual a planta proposta é simulada, o dimensionamento do hospital para a região conforme a carência de leitos e o dimensionamento e operação da planta.

2.1 Escolha da localidade para simulação

Estudos brasileiros publicados em artigos internacionais apresentam avaliações do recurso solar no Brasil usando o modelo físico de transferência radiativa BRASIL-SR para gerar mapas solares (Martins et al., 2007; Martins e Pereira, 2011; Martins. et al., 2008a). Outros artigos apresentam o potencial solar no Brasil para tecnologias fotovoltaicas (PV) (Martins; et al., 2008b) e fotovoltaicas concentradas (CPV) (Viana et al., 2011). Não há, porém, na literatura internacional uma estimativa detalhada de potencial CSP para o Brasil, carência de dados apontada por Malagueta *et. al.* (2013). Um dos primeiros estudos do gênero no país é de Burgi (2013), que objetivou avaliar o potencial para a tecnologia CSP no Brasil combinando uma análise com base em sistemas de informação geográfica (SIG), aplicando diversos critérios de aptidão de áreas à instalação de plantas CSP, com simulação de plantas virtuais de tecnologia de concentradores cilindro-parabólicos e torre central.

A irradiação normal direta (DNI) mínima recomendada para projetos de CSP é amplamente discutida na literatura científica, com mínimos sugeridos que variam de 1.700 kWh/m²/dia (Banco Mundial, 2009; Ummel, 2010) a 2.400 kWh/m²/dia (NREL, 2005; Fluri, 2009). Entretanto, o valor mais comumente utilizado é de 2.000 kWh/m²/ano, ou 6 kWh/m²/dia (Arvizu et al., 2011; Viebahn et al., 2011; IEA, 2010; Clifton e Boruff, 2010; Lovegrove et al., 2011; NREL, 2005).

2.2 Hospital de médio porte em Bom Jesus da Lapa

De modo a determinar a demanda fez-se necessário dimensionar o hospital. Para identificar a carência de leitos na região são obtidas as relações de leito por habitantes do município de Bom Jesus da Lapa e de todos os municípios adjacentes (são 8 municípios que fazem fronteira com BJJ) (IBGE, 2009).

A OMS (2012) utiliza indicadores de saúde e rankings para analisar e comparar a saúde em diferentes países do mundo, mas não há uma recomendação específica para a taxa de leitos por habitantes.

Assim, as taxas locais são comparadas com as taxas do estado da Bahia, com a taxa nacional e com o critério internacional (KFF, 2012 e OMS, 2012). É então dimensionado (arredondado para cima) o número de leitos do hospital para que a população de BJJ e dos 8 municípios no entorno atinjam a média nacional (detalhes na seção 3.2).

Quanto ao tamanho, os hospitais podem ser divididos em:

- pequeno porte (até 150 leitos);
- médio porte (entre 150 e 450 leitos), divididos também entre baixo e médio nível de conforto (consequentemente de consumo energético) e alto nível de conforto;
- grande porte (acima de 450 leitos) (Tolmasquim et. al., 2003).

O hospital proposto para BJJ é enquadrado na categoria de médio porte e foi definido como de alto nível de conforto. Tolmasquim et. al. (2003), a partir de levantamento dos hospitais do Brasil, fornecem as demandas médias de energia elétrica, água quente (banhos e lavanderia) e carga térmica de refrigeração, conforme Tabela 1. E assim calcula-se a demanda do hospital proposto para BJJ.

Tabela 1 – Características médias de um hospital de médio porte com conforto

Densidade de leito	0,0143 leito/m ²
Consumo total de energia	
mensal	2.682 kWh/leito
anual	32.184 kWh/leito
Parcela da energia usada como eletricidade	0,5700
Parcela da energia usada como eletricidade (excluindo uso para refrigeração e aquecimento)	0,3659
Ar condicionado	1,65 TR/100m ²
Demanda de água quente (a 60°)	125 litros/leito/dia
	45.625 litros/leito/ano

Fonte: Tolmasquim et. al. (2003)

As demandas calculadas a partir de Tolmasquim et. al. (2003) são médias e não o perfil de demanda. A demanda elétrica foi considerada constante, considerando a hipótese de comercialização do excedente quando houver e de compra da rede caso necessário. Assim o importante é o saldo entre consumo e geração. Entretanto é importante obter o perfil das demandas térmicas, tanto de frio quanto de calor.

A energia consumida foi distribuída ao longo do ano proporcionalmente à temperatura ambiente (quando T superou 20°C). O objetivo dessa estimativa é obter uma curva de carga variável no tempo, tanto em relação a dia e noite quanto ao longo do ano, que sirva de base para o dimensionamento da potência da planta CSP ISCC. Em função da disponibilidade de dados hora a hora, optou-se por essa proporcionalidade.

2.3 Planta CSP de tri-geração

Projeto

A planta é então dimensionada para atender a demanda térmica do hospital: dimensionamento em paridade térmica. Assim o vapor extraído da turbina tem de ser capaz de refrigerar o hospital durante a hora mais quente do ano através de um chiller de absorção. Após fornecer calor para o chiller, o vapor extraído da turbina passa no condensador e parte do calor extraído nesse trecho do ciclo é aproveitada para aquecer a água de baixa temperatura usada para banho e lavanderia.

A planta é composta por (vide Figura 1):

- Campo Solar (CS), foram modeladas duas configurações: uma sem armazenamento e outra com 3 horas de armazenamento;
- Duas turbinas a gás, doravante chamadas TAG1 e TAG2 (detalhes do dimensionamento na seção 4.3);
- Turbina a vapor de contrapressão, doravante chamada TAV (detalhes do dimensionamento na seção 4.3);
- Chiller de absorção de estágio único (projetado para atender a potência máxima de refrigeração durante a hora mais quente do ano).

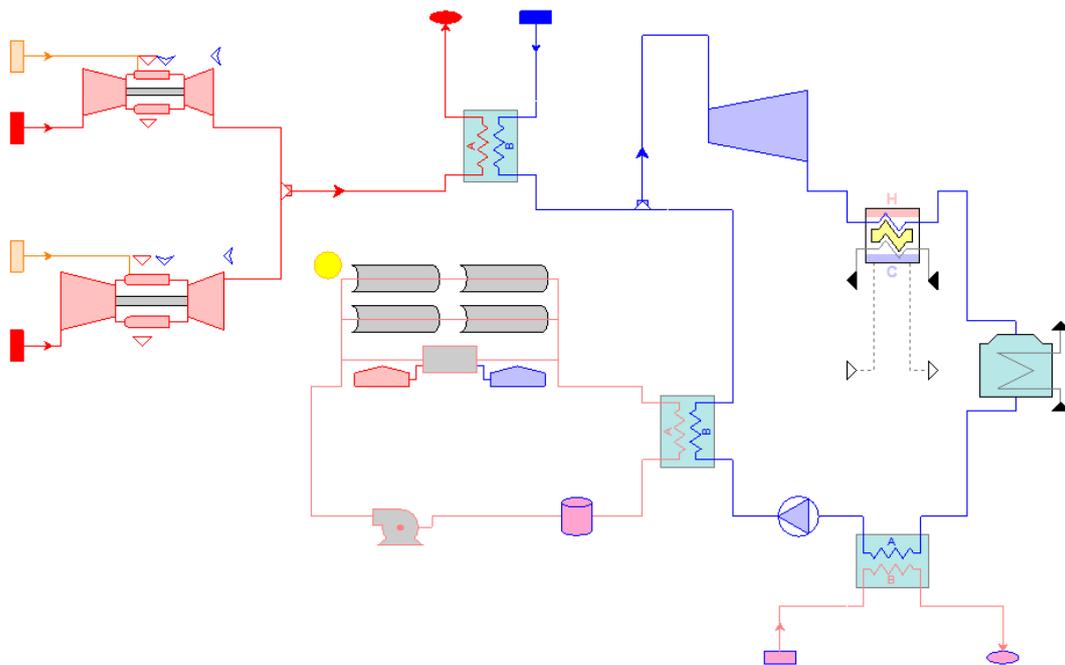


Figura 1 – Esboço da planta ciclo combinado com tri-geração

O calor necessário para operar o chiller é extraído da TAV. O vapor é extraído na condição de vapor saturado, e é condensado, transferindo calor para o chiller. A TAV é então dimensionada para atender a demanda do chiller.

A demanda por vapor da TAV tem de ser atendida tanto pelos coletores (caso a demanda ocorra em horários de sol), como pelo ciclo combinado operado pelas turbinas a gás (durante os horários nublados ou noturnos).

Quanto à água de banho e lavanderia (demanda a 60°C) é proposto que toda a água necessária por dia seja aquecida ao longo de 6 horas diárias, de preferência absorvendo calor produzido exclusivamente no campo solar (CS) e sendo armazenada em tanques. Para garantir a água a 60°C, escolheu-se aquecê-la e armazená-la a 70°C.

O CS é simulado no SAM (*System Advisor Model*, SAM/NREL, 2011) e as condições termodinâmicas do fluido térmico são utilizadas para cálculos em planilha excel da operação do ciclo de cogeração segundo literatura técnica vigente (Incropera, 2011; Wylen, V. et. al., 2000).

Operação

Dimensionar os componentes de modo a atender ao pico de refrigeração significa que a planta está sobredimensionada em relação à carga de refrigeração a maior parte do ano e que o hospital é autossuficiente nesse aspecto.

A TAV pode ser acionada pelo vapor do CS, da TAG1, da TAG2 ou de qualquer combinação entre os três componentes. Tudo vai depender da quantidade de irradiação e da demanda do hospital a cada hora.

A operação do campo solar (sem e com armazenamento) é simulada no SAM e o principal resultado obtido do software é o fluxo de calor obtido pelo campo solar hora a hora.

Os outros componentes da planta, entre os quais as TAGs 1 e 2, a TAV e o chiller, são modelados hora a hora em regime permanente.

As figuras a seguir apresentam a DNI e a temperatura ambiente para os três dias escolhidos, o mais quente do ano (11/09) (Figura 2), o mais frio (30/06) (Figura 3) e o terceiro dia do ano por apresentar radiação oscilante devido à nebulosidade (Figura 4).

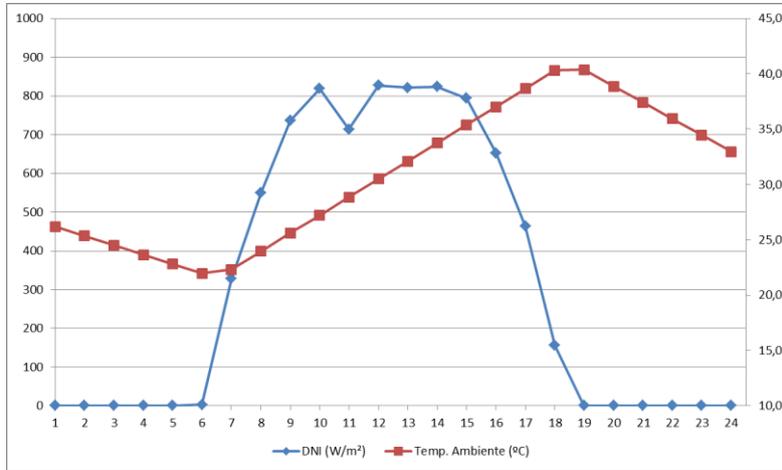


Figura 2 – Dia mais quente do ano
Fonte: SWERA (2012)

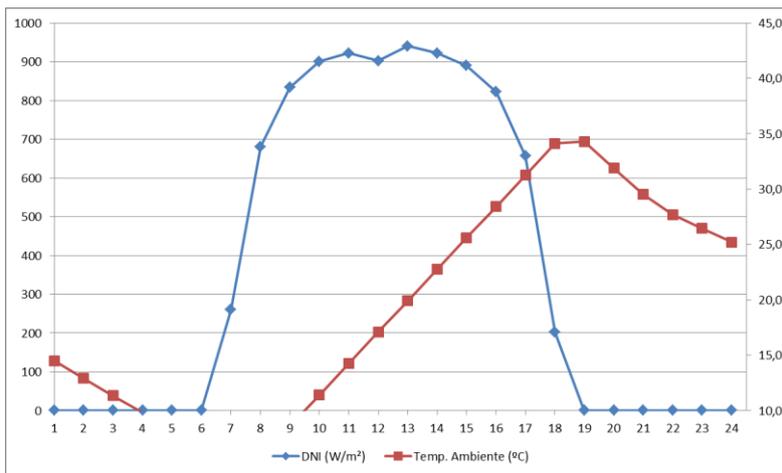


Figura 3 – Dia mais frio do ano
Fonte: SWERA (2012)

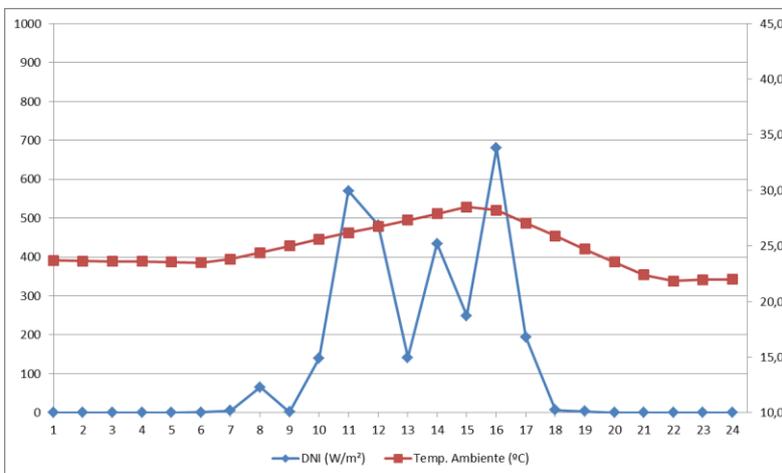


Figura 4 – 3º dia do ano
Fonte: SWERA (2012)

3. PLANTA CSP DE TRI-GERAÇÃO – ESTUDO DE CASO PARA UM HOSPITAL DE MÉDIO PORTE EM BJJ

3.1 Escolha de Bom Jesus da Lapa e dados climatológicos

O SAM requer dados climatológicos em base horária. A disponibilidade desses dados é um limitador para muitas regiões fora dos EUA, já que, de acordo com Wilcox e Marion (2008), a principal fonte de dados climatológicos dos outros países vem de estações de aeroportos. Enquanto os EUA possuem medições para 1020 localidades em todo seu território, o Brasil possui medições em apenas 24 localidades: Belo Horizonte, Boa Vista, Bom Jesus da Lapa, Brasília, Campo Grande, Cuiabá, Curitiba, Florianópolis, Fortaleza, Jacareacanga, Manaus, Petrolina, Porto Nacional, Porto Velho, Recife, Rio de Janeiro, Salvador, Santa Maria e São Paulo.

Destas 24 localidades, Bom Jesus da Lapa é a que apresenta maior DNI (acima de 6kWh/m²/dia). A Figura 5 apresenta o mapa de DNI no Brasil e a localização de Bom Jesus da Lapa na Bahia, enquanto a Tabela 2 apresenta o resumo dos dados climatológicos de BLJ.

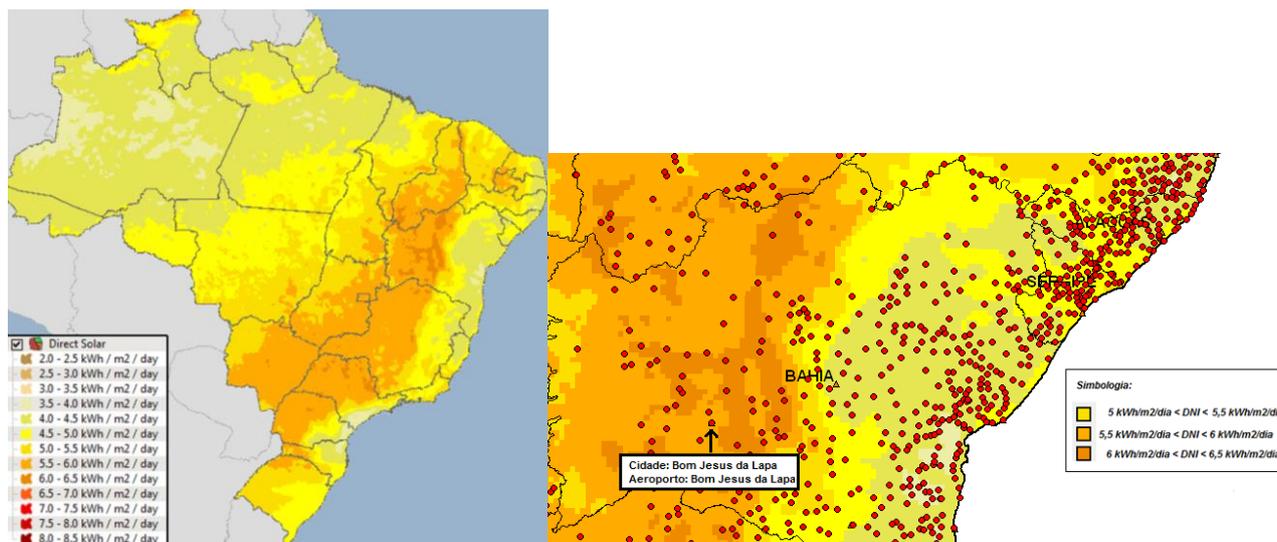


Figura 5 – Irradiação normal direta (DNI) no Brasil e identificação de Bom Jesus da Lapa

Fonte: Geospatial Toolkit (2012)

Fonte: Elaboração própria usando o software GeospatialToolkit

Tabela 2. Dados climatológicos de Bom Jesus da Lapa

Informação da localidade	Cidade	Bom Jesus da Lapa (BJL)
	Estado	Bahia
	Fuso horário	GMT-3
	Elevação	458 m
	Latitude	-13,27°
	Longitude	- 43,42°
Dados climatológicos anuais	Irradiação direta normal (DNI)	2.198,5 kWh/m ² .ano
	Irradiação global horizontal	2.143,2 kWh/m ² .ano
	Temperatura de bulbo seco	26,1 °C
	Velocidade do vento	1,6 m/s

Fonte: Elaboração própria usando dados do SAM/DVIEW

3.2 Dimensionamento do Hospital

O município de Bom Jesus da Lapa, de acordo com censo do IBGE (2009), possui 63.480 habitantes e 83 leitos (públicos e particulares), o que resulta em 13,07 leitos/10mil habitantes. Abaixo da média do estado da Bahia, de aproximadamente 20,76 leitos/10mil hab.. Segundo KFF (2012) e OMS (2012) a média mundial é de 30 leitos/10mil hab. e o Brasil ocupa a 49ª posição no ranking de países com média de 24 leitos/10mil hab.

Observa-se, portanto, que B JL é uma cidade carente de acesso a hospitais, e ao observar os municípios adjacentes a B JL, constata-se que todos possuem média inferior às médias nacional e estadual (vide Tabela 3). Os 9 municípios totalizam 265.405 habitantes (com B JL representando 23,9%) e possuem taxa de 14,05 leitos/10mil hab.

Tabela 3 – População e leitos de Bom Jesus da Lapa e dos 8 municípios adjacentes

2009	População	Leitos	Leitos por 10 mil hab.
Bom Jesus da Lapa	63.480	83	13,07
Santana	24.750	37	14,95
Sítio do Mato	12.050	23	19,09
Muquém de São Francisco	10.272	0	0
Paratinga	29.504	44	14,91
Macaúbas	47.051	69	14,66
Riacho de Santana	30.646	55	17,95
Malhada	16.014	32	19,98
Serra do Ramalho	31.638	30	9,48
Total	265.405	373	14,05

Fonte: IBGE (2009)

O estudo propõe dimensionar o hospital em B JL de modo a elevar a média de toda a região composta pela própria cidade mais os 8 municípios adjacentes até a média nacional. Essa taxa é obtida se introduzidos 264 leitos à região. Assim, o valor foi arredondado e o hospital dimensionado para 270 leitos. O que representaria um aumento na oferta de leitos da região em 72%. Assim, o hospital proposto para B JL é de médio porte e foi definido também como de alto nível de conforto. A partir das médias de consumo da Tabela 1, o hospital proposto para B JL possui as seguintes demandas, conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Principais dados do hospital proposto para B JL

Leitos	270
Área	18.881 m ²
Demanda de eletricidade	3.179.901 kWh/ano
	8.712 kWh/dia
	363 kWh/hora
Demanda de refrigeração	
potência média	311,54 TR
energia	3,46 * 10 ¹³ J/ano
Demanda de água quente (a 60°C)	33.750 litros/dia
	12.318.750 litros/ano

A demanda anual por refrigeração, 3,46 * 10¹³ J/ano é distribuída ao longo do ano proporcionalmente a temperatura ambiente. Assim, para a hora mais quente do ano, que atingiu 40,4 °C, a potência de refrigeração requerida é de aproximadamente 1.740 kW. Sendo assim, essa é a potência do Chiller.

3.3 Simulação da Planta CSP de Tri-geração

O chiller é projetado para atender a demanda por refrigeração no momento mais quente do ano (temperatura ambiente de 40,4 °C). Sua potência de refrigeração (a capacidade de remover calor do ambiente) é de 1.740 kW e, para tal, demanda 2.335kW de calor no gerador de vapor.

A condição de projeto em regime permanente é apresentada no esboço da Figura 6.

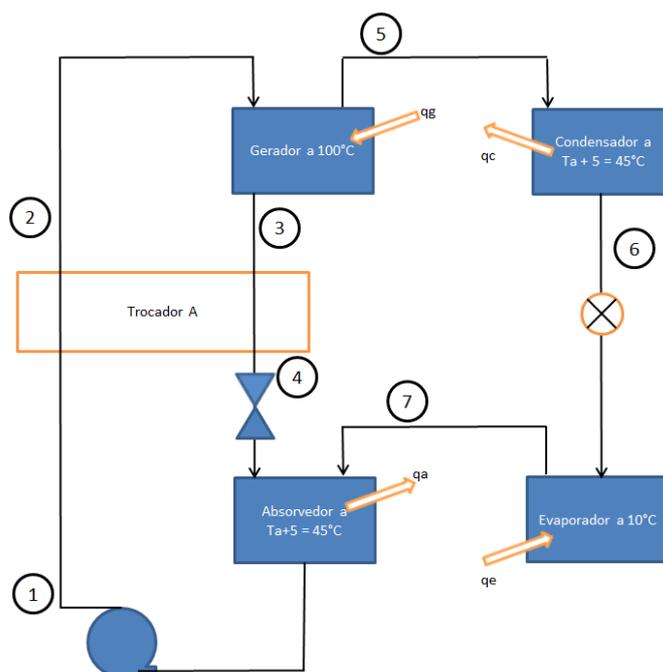


Figura 6 – Esboço do chiller de absorção

Os principais dados técnicos de operação do chiller na condição de potência máxima, em regime permanente, segundo equilíbrio termodinâmico de acordo com (Wylen, V. et. al., 2000) encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5 – Principais dados de operação em potência máxima e em regime permanente do Chiller

Chiller		
Temperatura no absorvedor (Solução LiBr-água)	T1	45°C
Concentração da solução nos pontos 1 e 2		0,6
Solução LiBr-água	T2	84°C
Temperatura no gerador (Solução LiBr-água)	T3	100°C
Concentração da solução nos pontos 3 e 4		0,64
Solução LiBr-água	T4	55°C
Coefficiente global de transferência de calor multiplicado pela área de troca térmica trocador de calor	UA	70kW/K
Temperatura no gerador	T5	100°C
Temperatura no condensador	T6	45°C
Temperatura no evaporador	T7	10°C
Vazões mássicas		
nos pontos 1 e 2		11,94kg/s
nos pontos 3 e 4		11,19kg/s
nos pontos 5, 6 e 7		0,74kg/s

Conforme metodologia apresentada, o chiller é alimentado pelo vapor extraído da TAV. Foi determinada a condição do vapor saturado na saída da turbina a 200kPa (120,2 °C) e título, $x=1$, que é condensado até título, $x=0$. Portanto, obtém-se a vazão necessária de vapor para fornecer o calor necessário ao chiller (Wylen, V. et. al., 2000). Deste balanço obtém-se a vazão de 1,18kg/s de vapor. Sendo as condições de operação da turbina segundo Tabela 6.

Tabela 6 – Projeto da turbina a vapor

TAV	
Vapor na entrada	10 MPa
	380 °C
Vapor na saída	200 kPa
	120 °C
Vazão máxima	1,20 kg/s

O vapor necessário para acionar a TAV pode ser gerado a partir do calor proveniente do CS ou dos exaustos das TAGs. As principais especificações técnicas do campo solar são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Principais dados técnicos do campo solar

Irradiação direta normal de projeto	750,0 W/m ²
Fluido de transferência de calor	Therminol VP-1
Coletor	Solargenix SGX-1
Receptor	Schott PRT70

Assim é estimada no SAM a área necessária de coletores para atender a demanda de vapor para a radiação de projeto, e assim estimada a área total da planta em aproximadamente 2,8 hectares. E foi estipulado que o sistema com armazenamento de 3 horas possui aproximadamente o dobro de área, 5,5 hectares.

Turbinas a gás operando fora da carga plena perdem muito em eficiência portanto a potência requerida foi dividida em duas turbinas a gás de porte diferente e que as turbinas são operadas apenas a carga plena ou desligadas.

Durante as horas noturnas, as TAGs em conjunto devem ser capazes de operar a TAV a plena carga. Considerando uma razão de pressão de 8, eficiência do compressor de 0,8 e da turbina de 0,85, as condições de projeto das TAG1 e TAG2 são apresentadas na Tabela 8. Assim a TAV é determinada com potência nominal de 640kW.

Tabela 8 – Condições de projeto e de operação a carga plena das turbinas a gás 1 e 2

	TAG1	TAG2
Razão de pressão	8	8
Entrada do compressor	100kPa; 25°C	100kPa; 25°C
Entrada da câmara de combustão	800kPa; 267°C	800kPa; 267°C
Entrada da turbina	800kPa; 1100°C	800kPa; 1100°C
Saída da turbina	100kPa; 485°C	100kPa; 485°C
Vazão	2,6 kg/s de ar	4,5 kg/s de ar
Potência	575 kW	1000 kW

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 9 mostra que os dias com armazenamento geram menos eletricidade. Isso ocorre porque o perfil de operação foi determinado para usar as turbinas a gás apenas quando necessário e não com o objetivo de maximizar a produção de eletricidade. Logo, os tanques de armazenamento e a maior quantidade de espelhos conferem ao campo solar maior autonomia, o que é coerente com a maior geração elétrica por parte da TAV se comparado ao mesmo dia sem armazenamento.

Tabela 9 – Resumo das operações das plantas de tri-geração

Condição	Dia	Calor produzido no CS [MJ]	TAV	TAG1		TAG2		Total	Consumo	Excedente
			kWh	kWh	h	kWh	h	kWh		
I	Quente 0TES	106.412	12.118	5.072	9	13.720	14	30.910	8.712	22.197
II	Frio 0TES	94.880	9.569	6.762	12	6.860	7	23.191		14.479
III	3º dia 0TES	39.462	10.096	2.254	4	19.600	20	31.950		23.238
IV	Quente 3TES	160.554	12.236	1.691	3	10.780	11	24.706		15.994
V	Frio 3TES	152.490	10.272	4.508	8	3.920	4	18.700		9.988
VI	3º dia 3TES	79.098	10.560	564	1	17.640	18	28.764		20.052

A maior demanda por refrigeração no dia mais quente acarreta em maior uso das turbinas a gás do que no dia frio. Durante as últimas quatro horas do dia, o dia quente precisa que ambas as TAGs sejam ligadas de modo a operar a TAV em potência máxima e assim oferecer vazão de vapor suficiente para operar o chiller, enquanto que no dia frio bastou ligar apenas a TAG2.

A operação do terceiro dia do ano é interessante ser observada devido à oscilação da DNI ao longo do dia. O fluxo de calor proveniente do CS é insuficiente para refrigerar o hospital durante quase todas as horas diurnas (exceto de 15h as 16h). Assim sendo, a TAG1 opera por 4 horas durante o dia e a TAG2 por 20 horas. Essa quantidade de horas de operação das TAGs faz com que, das seis condições simuladas, esta seja a de maior geração elétrica (rever Tabela 9).

A geração elétrica durante os três dias analisados foi bem superior à demanda do hospital. O projeto da planta dimensionada para a paridade térmica fez com que a planta ficasse sobredimensionada em relação à capacidade de geração de eletricidade e o consumo da mesma. Portanto, para uma análise econômica da planta, seria adequado estudar a hipótese de a eletricidade ser negociada bilateralmente ou no mercado livre.

5. CONCLUSÃO

Segundo as hipóteses apresentadas neste estudo, e de acordo com os arranjos de planta CSP propostos, as simulações desenvolvidas mostraram a viabilidade técnica de implementação de uma planta CSP ISCC de tri-geração.

A análise paramétrica da planta mostrou também que a planta poderia suprir de forma autônoma um hospital de médio porte anexo à planta. Mesmo as simulações tendo sido feitas para apenas três dias, as condições de projeto dimensionadas para a demanda máxima, e o ciclo combinado a gás natural, garantem a autonomia da operação em qualquer dia do ano. A planta poderia ainda maximizar a geração elétrica, o que não foi feito neste estudo, e cabe análise do potencial de comercialização da eletricidade excedente.

A construção de uma planta do gênero por parte do governo contribuiria para o desenvolvimento da tecnologia CSP no país, gerando demanda por equipamentos e mão-de-obra especializada. A construção de um hospital autônomo em região tão carente acarretaria em impactos sociais e econômicos na região. Portanto, além de uma análise estritamente econômica, faz-se importante também um estudo que avalie as externalidades positivas do empreendimento.

O arranjo foi proposto para atender as demandas de um hospital, mas arranjos similares poderiam atender diferentes demandas de calor, frio e eletricidade de outras instalações, como indústrias e prédios comerciais (shopping centers por exemplo).

Agradecimentos

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Cepel/Eletronbras pelo apoio financeiro na forma de bolsa de estudo.

REFERÊNCIAS

- Al-Sulaiman, F.A.; Hamdullahpur, F.; Dincer, I., 2012. Performance assessment of a novel system using parabolic trough solar collectors for combined cooling, heating, and power production. *Renewable Energy* n. 48, p. 161-172.
- Arvizu, D.; Balaya, P.; Cabeza, L. et al., 2011. Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation SRREN, Chapter 3. Direct Solar Energy. Cambridge and New York: IPCC. Available at: <<http://srren.ipcc-wg3.de/>>. Accessed on sep/2011.
- Banco Mundial, 2009. Cost Reduction Study for Solar Thermal Power Plants. Washington, D.C. Disponível em: <<http://www.solarpaces.org/Library/docs/STPP%20Final%20Report2.pdf>> Acessado em nov/2011
- Burgi, 2013. Avaliação do potencial técnico de geração elétrica termossolar no Brasil a partir de modelagem em SIG e simulação de plantas virtuais. Dissertação de M.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, PPE/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Clifton, J.; Boruff, B. J., 2010. Assessing the potential for concentrated solar power development in rural Australia. *Energy Policy*, v. 38, n. 9, p. 5272-5280.
- Fluri, T. P., 2009. The potential of concentrating solar power in South Africa. *Energy Policy* 37, pp. 5075-5080.
- Geospatialtoolkit, 2012. Version 1.2.0. Disponível em: <www.nrel.gov> Acessado em nov/2012.
- González, P., 2008. Ten years of renewable electricity policies in Spain: An analysis of successive feed-in tariff reforms. *Energy Policy* n.36 p.2917– 2929.
- IBGE, 2009. Censo Brasil 2009. Disponível em: <http://cidades.ibge.gov.br/xtras/home.php?lang=> Acessado em: jan/2013.
- IEA, 2010. Technology Roadmap – Concentrating Solar Power. International Energy Agency.
- Incropera, F.P., 2011. Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa. 6ª edição, LTC.
- Kalogirou, S. A., 2009. Solar energy engineering: processes and systems. 1ª edição, Academic Press, Elsevier, EUA.
- KFF – Kaiser Family Foundation, 2012. U.S. Global Health Policy, Country Data. Disponível em: <http://www.globalhealthfacts.org/data/topic/map.aspx?ind=78> Acessado em: Abr/2013.
- Lovegrove, K.; Wyder, J.; Agrawal, A. et al., 2011. Concentrating Solar Power in India. Australia: Department of Climate and Energy Efficiency. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/59281715/CSP-Report>>. Acessado em out/2011.
- Malagueta, D.C., 2013. Avaliação de Alternativas para Introdução da Geração Elétrica Termossolar na Matriz Energética Brasileira. Tese de Doutorado em Planejamento Energético, PPE/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- Malagueta, D.C.; Szklo, A.S.; Borba, B.S.M.C.; Soria, R.; Aragão, R.; Schaeffer, R.; Dutra, R. Assessing incentive policies for integrating centralized solar Power generation in the Brazilian electric power system. *Energy Policy*, n.59, p.198-212.
- Martins, F.R.; Pereira, E.B.; Abreu, S. L., 2007. Satellite-derived solar resource maps for Brazil under SWERA project. *Solar Energy*, v. 81, n. 4, p. 517–528.
- Martins, F.R.; Pereira, E.B.; Silva, S. A. B.; Abreu, S. L.; Colle, S., 2008a. Solar energy scenarios in Brazil, Part one: Resource assessment. *Energy Policy*, v. 36, n. 8, p. 2853–2864.
- Martins, F.R.; Rüther, R.; Pereira, E.B.; Abreu, S. L., 2008b. Solar energy scenarios in Brazil. Part two: Photovoltaics applications. *Energy Policy*, v. 36, n. 8, p. 2865–2877.

- Martins, F.R.; Pereira, E.B., 2011. Enhancing information for solar and wind energy technology deployment in Brazil. *Energy Policy*, v. 39, n. 7, p. 4378–4390.
- NREL, 2005. Potential for Renewable Energy in the San Diego Region. San Diego, California: National Renewable Energy Laboratory NREL.
- OMS, 2012. World Health Statistics 2012. Disponível em: http://www.who.int/gho/publications/world_health_statistics/2012/en/index.html. Acessado em: Abr/2013.
- SAM/NREL, 2011. Software System Advisor Model (SAM), versão 2011.6.30. Disponível em: <https://sam.nrel.gov/> Acessado em jun/2013.
- Soria, R., 2011. Cenários de geração de eletricidade a partir de geradores heliotérmicos no Brasil: a influência do armazenamento de calor e da hibridização. Dissertação de M.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, PPE/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- SWERA, 2012. Disponível em: <http://maps.nrel.gov/SWERA> Acessado em nov/2012.
- Taylor, M., 2008. Beyond technology-push and demand-pull: Lessons from California's solar policy. *Energy Economics*, n. 30, p. 2829-2854.
- Tolmasquim, M.T.; Szklo, A.S.; Soares, J.B., 2003. Mercado de Gás Natural na Indústria Química e no Setor Hospitalar do Brasil. 1ª edição, Rio de Janeiro, UFRJ, COPPE, CENERGIA.
- Tsoutsos, T.; Aloumpi, E.; Gkouskos, Z.; Karagiorgas, M., 2010. Design of a solar absorption cooling system in a Greek hospital. *Energy and Buildings* n.42, p. 265-272.
- Ummel, K., 2010. Concentrating Solar Power in China and India: A Spatial Analysis of Technical Potential and the Cost of Deployment. Massachusetts: School of Earth, Atmospheric, and Environmental Sciences University of Manchester. Disponível em: http://www.cgdev.org/files/1424287_file_Ummel_ChinaIndiaCSP_FINAL.pdf. Acesso em: out/2011
- Viana, T. S.; Rütther, R.; Martins, F.R.; Pereira, E.B., 2011. Assessing the potential of concentrating solar photovoltaic generation in Brazil with satellite-derived direct normal irradiation. *Solar Energy*, v. 85, n. 3, p. 486–495.
- Viebahn, P.; Lechon, Y.; Trieb, F., 2011. The potential role of concentrated solar power (CSP) in Africa and Europe--A dynamic assessment of technology development, cost development and life cycle inventories until 2050. *Energy Policy*, v. 39, n. 8, p. 4420–4430.
- Wilcox, S.; Marion, W., 2008. Users Manual for TMY3 Data Sets. NREL, Colorado. Disponível em: <http://www.nrel.gov/docs/fy08osti/43156.pdf> Acessado em nov/2011.
- Wiser, R.; Barbose, G.; Holt, E., 2011. Supporting solar power in renewables portfolio standards: Experience from United States. *Energy Policy*, n.39, p. 3894-3905.
- Wylen, V. et. al., 2000. Fundamentos da termodinâmica. Edgard Blücher LTDA, Brasil.

PARAMETRIC ANALYSIS OS A CSP-ISCC TRIGENERATION PLANT FOR A HOSPITAL AT BOM JESUS DA LAPA

Abstract. *This work presents a parametric analysis of a CSP power plant with parabolic trough in a combined cycle (ISCC) for tri-generation (cooling through an absorption cycle, low quality process heat and electricity) in Bom Jesus da Lapa. The international literature shows that costs for centralized CSP plants are still unable to compete in the energy market in Brazil and in the world without incentive policies. And also that cogeneration with CSP technologies are still under R&D programs. That's why this paper proposes a tri-generation power plant as a government R&D investment. The work proposes to verify the technical feasibility of a CSP ISCC power plant for tri-generation that generates energy for a medium size hospital in Bom Jesus da Lapa. The plant is designed to meet the hospital cooling needs for the hottest day on a year. The simulations are made for three days: the hottest one, the coldest one, and a cloud day with a lot of DNI variations during the daily hours. The analysis are made for a plant without thermal storage and with 3-hour thermal capacity. The results indicate that the hospital would be self-sufficient and also would generate more than double of its produced electricity. This electricity would be available for selling in market.*

Key words: Solar Thermal Power, CSP, Cogeneration, Simulation, Parabolic trough